

Open Access

Berl Münch Tierärztl Wochenschr 126,
96–103 (2013)
DOI 10.2376/0005-9366-126-96

© 2013 Schlütersche
Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG
ISSN 0005-9366

Korrespondenzadresse:
j.seedorf@hs-osnabrueck.de

Eingegangen: 31.05.2012
Angenommen: 08.11.2012

Online first: 08.03.2013
[http://vetline.de/zeitschriften/bmtw/
open_access.htm](http://vetline.de/zeitschriften/bmtw/open_access.htm)

Zusammenfassung

Summary

U.S. Copyright Clearance Center
Code Statement:
0005-9366/2013/12603-96 \$ 15.00/0

Hochschule Osnabrück, Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur

Wirkung von atmosphärischem Ammoniak auf Nutztiere – eine Kurzübersicht

Impact of atmospheric ammonia on livestock animals – a minireview

Jens Seedorf

Ammoniak stellt unter den Spurengasen der Stallluft ein Leitgas dar, dem aufgrund seiner chemisch-physikalischen Natur und in Abhängigkeit von den Expositionsumständen eine irritative Wirkung auf respiratorische Schleimhäute, Augen und Haut von Tier und Mensch zugesprochen werden kann. Hierbei erstrecken sich die Effekte von Leistungseinbußen über Minderungen der mukoziliären Clearance bis hin zu Störungen der epithelialen Homöostase und der Manifestation von Entzündungen im Atemtrakt. Darüber hinaus zeigen bestimmte Nutztierarten ein Meidungsverhalten gegenüber Ammoniakkonzentrationen, die unter den gesetzlich festgelegten Grenzwerten liegen. Da auch zukünftig Ammoniak als potenzielle Noxe in der Tierhaltung zu beachten ist, vermittelt die Kurzübersicht auf Basis der vorliegenden Literatur die Kenntnisse über die biologischen Wirkungen luftgetragenen Ammoniaks bei Geflügel, Schweinen und Rindern.

Schlüsselwörter: Nutztierhaltung, Ammoniak, Exposition, mukoziliäre Clearance, Meidungsverhalten

Ammonia is one of the most important trace gases in the air of livestock buildings. Due to its physical and chemical properties and in dependance on the exposure conditions ammonia belongs to the irritant gases with a capability to have a negative impact on the respiratory mucosa, the eyes and the skin of animals and men. The observed effects are ranging from performance losses over reductions of the mucociliary clearance to disturbances of the epithelial homeostasis including airway inflammations. Furthermore, some livestock species have shown in choice tests their affinity to a low ammoniated environment, where exposure concentrations were considerable lower than the threshold limit values fixed in animal welfare regulations. It can be expected that ammonia will continuously be of relevance in future. Therefore, this article gives a short literature-based overview about the biological impact of ammonia on poultry, pigs and cattle.

Keywords: livestock housing, ammonia, exposure, mucociliary clearance, avoidance behaviour

Einleitung

Das Gas Ammoniak (NH_3) zählt zu den hygienisch relevanten Spurengasen in der Stallluft und ist ein ständiger Begleiter im Leben von Nutztieren. Bereits Klimmer (1914) bemerkte, dass ‚Ammoniak-verdorbene‘ Luft die Augenbindehaut und Respirationsschleimhaut reizt. Die tatsächliche Präsenz des Gases kann auch heutzutage an täglichen mittleren NH_3 -Gehalten von beispielsweise 6,4 ppm in Milchviehställen, 15,9 ppm in Mast Schweinehaltungen und bis zu 21,2 ppm in Broilerställen abgelesen werden (Seedorf und Hartung, 1999). Darüber hinaus sind aber auch Maximalkonzentrationen zwischen etwa 40 ppm und 73 ppm zu verzeichnen, wie diese vornehmlich in der Schweine- und Geflügelhaltung bestimmt wurden (Groot Koerkamp et al., 1998).

Bedingt durch seine physikalisch-chemischen Eigenschaften kann NH_3 alleine oder in Koexistenz mit weiteren inneren und äußeren Stressoren eine Belastung für den Menschen und das Tier darstellen, was nicht in jedem Fall ohne ökonomische und gesundheitliche Konsequenzen bleibt. Aus diesem Grund liefert die vorliegende Literaturübersicht nicht nur eine kurze Gesamtcharakterisierung des luftgetragenen Ammoniaks, um dessen tierhygienische Bedeutung für das Tierwohl herauszustellen, sondern auch Anhaltspunkte zur Messmethodik.

Entstehung und physikalisch-chemische Eigenschaften

Ammoniak entsteht durch mikrobielle Umwandlungsprozesse aus Stickstoffträgern. Die wichtigsten Substrate hierbei sind Harnstoff und Proteine (z. B. Exkremate, Futtermittelreste, Milch), die in reichhaltigen Mengen im Stall von Haussäufern vorkommen (Mehlhorn, 1979). Aber auch im Geflügelbereich findet sich in Form der mit dem Kot ausgeschiedenen Harnsäure ein Ausgangssubstrat für die Ammoniakentstehung im Stall. Als Schlüsselenzyme bei der chemischen Umsetzung fungieren die Urease (Harnstoffspaltung) und Urikase (Harnsäurespaltung), die im Wesentlichen von Fäkalbakterien stammen (Carlile, 1984; Groot Koerkamp et al., 1998).

Ammoniak ist farblos und von beißendem Geruch. Die Geruchswahrnehmungsschwelle ist mit 5 ppm beim Menschen vergleichsweise niedrig, kann aber aufgrund einer über die Expositionszeit einsetzenden olfaktorischen Ermüdung oder Anpassung bis auf etwa 53 ppm steigen (Makarovsky et al., 2008). Mit einer physikalischen Dichte von $0,77 \text{ kg/m}^3$ (Luft: $1,2 \text{ kg/m}^3$) unter Normalbedingungen gehört es zu den leichteren, in ruhender Stallatmosphäre aufsteigenden Gasen (ATSDR, 2004; Wilmes, 1993). Herausragendes Merkmal von Ammoniak ist seine gute Wasserlöslichkeit, die temperaturabhängig ist und nach folgender Protolyse im Wasser verläuft:



Bei 20°C beträgt die Wasserlöslichkeit etwa 34 % (w/w; ATSDR, 2004) oder 541 g/l. Der Dampfdruck wird mit etwa 8,57 bar bei ebenfalls 20°C angegeben (IFA, 2012). Bei einem pH-Wert von 9,25 ($\text{pK}_a = 9,25$) liegt die Hälfte des Ammoniaks nicht ionisiert vor, die andere Hälfte als Ammonium (NH_4^+). Einstellungen des pH-Wertes von

8,25 und 7,25 führen zu einem 90%igen bzw. 99%igen Ionisierungsgrad des Ammoniaks (ATSDR, 2004).

Gasförmiges Ammoniak soll mit Partikelgrößen zwischen $0,0005$ und $0,01 \mu\text{m}$ gleichzusetzen sein, womit es theoretisch den Ultrafeinstäuben zuzurechnen wäre, kann aber auch selbst an Staubpartikeln haften (Wenger, 1999). So kommen Reynolds et al. (1998) zu dem Schluss, dass 15–23 % des luftgetragenen Ammoniaks in Ställen an Partikel assoziiert ist. Weitere Quantifizierungen dieser Beobachtung haben gezeigt, dass zwischen etwa 1 und $7 \mu\text{g NH}_3$ pro mg einatembaren und alveolengängigen Staub zu finden sind und damit höhere lokale NH_3 -Einwirkungen im Gewebe durch Partikeldepositionen möglich scheinen als unter ausschließlicher Berücksichtigung des gasförmigen NH_3 -Anteils (Takai et al., 2002). Die Gas-Partikel-Assoziation verhilft dem NH_3 somit auch, in tiefere Regionen des Atemtraktes zu penetrieren.

Wirkungsbandbreite

Allgemeine pathologische und histologische Reaktionen

Bedingt durch die gute Wasserlöslichkeit des Ammoniaks führt eine inhalative Verfügbarkeit des Ammoniaks primär zu einer Kumulation des Gases auf den feuchten Schleimhäuten des oberen Respirationstraktes, wobei sich Ammoniumhydroxid (NH_4OH) als Base bildet. Das leicht saure Milieu des Schleimes von etwa pH 6,6 kann durch die Pufferkapazität des Mukus und des darin eingebundenen Bikarbonats in gewissen Grenzen stabilisiert werden (Fischer und Widdicombe, 2006). Kommt es zu einer Alkalisierung reagiert die Mukosa über die Becherzellen mit einer erhöhten Schleimsekretion (Rogers, 1994) und es treten Veränderungen in der elektrischen Leitfähigkeit des Schleimes auf, was wiederum Salz- und Wasserbewegungen wie auch die Konzentration der Inhaltsstoffe beeinflusst. Bei einem in vitro erzeugten pH-Wert von 9,76 war an bovinen Trachealringen keine Kinozilienbewegung mehr zu beobachten (Holma et al., 1977).

Nach Zitaten in Hoerr (2010) führen qualitative Veränderungen des Mukus im Zuge irritativer Einwirkungen zu einer Viskoelastizitätszunahme, die an einer Effizienzmindering der mukoziliären Clearance beteiligt ist. Neben diesem rheologischen Phänomen verdienen gerade auch antimikrobiell wirkende Proteine im Mukus Beachtung, da jene pH-sensitiv sind und aufgrund dessen ihre Wirkungspotenz bei pathophysiologischen Abweichungen nicht voll entfalten können (Fischer und Widdicombe, 2006). Sezernierte Defensine gehören mit ihrer antimikrobiellen Wirkung zur ‚first line of defense‘ in den Atemwegen und haben ihren isoelektrischen Punkt bei etwa pH 8,9–9,5 (Rogan et al., 2006). Da am isoelektrischen Punkt die Wasserlöslichkeit im Allgemeinen am geringsten ist, dürfte dies auch Konsequenzen für die Funktionalität derartiger Abwehrstoffe haben, da aufgrund einer fehlenden Hydrathülle Präzipitationen nicht auszuschließen sind. Als nicht weniger relevant können Antioxidantien im Schleim gelten, die sich gegen eingeatmete Noxen formieren. Der protektive Charakter der Antioxidantien kann jedoch durch Ammoniak und andere Luftschadstoffe überfordert werden, in dessen Folge ein oxidativer Stress entsteht, der die respiratorischen Epithelzellen schädigt (Bottje et al., 1998).

In das Atemwegepithel sind freie Nervenendigungen integriert, die als Schmerzrezeptoren (Nozizeptoren) fungieren können. Unter diesen befinden sich C-Fasern, die hauptsächlich gegenüber chemisch irritierenden Stimuli sensibel reagieren. Die Inhalation von Ammoniak verursacht hierüber eine vermehrte Atemtätigkeit (Sant'Ambrogio und Widdicombe 2001), führt aber auch zu einer Freisetzung von Neuropeptiden wie den Tachykininen, die für die Übertragung und Entstehung moderater bis intensiver Schmerzempfindungen verantwortlich gemacht werden (Cao et al., 1998), Bronchokonstriktionen auslösen und an neurogenen Entzündungen beteiligt sind (Barnes, 2001). Moreaux et al. (2000) haben nach einer NH_3 -Exposition von 30 ppm beim Schwein nicht nur eine Tachykinin-basierte Herabsetzung des Hustenreflexes, sondern auch eine Selbstreinigungsminderung der Atemwege beschrieben.

In Abhängigkeit von der einwirkenden NH_3 -Konzentration kann die alkalische Intervention zu einer Kolliquationsnekrose führen, die im Vergleich zu säurebedingten Koagulationsnekrosen eine größere Tiefenwirkung besitzt. Das entstehende NH_4OH verläuft als exotherme Reaktion und ist prinzipiell in der Lage thermisch bedingte Verletzungen zu verursachen (Makarovsky et al., 2008).

Es lässt sich festhalten, dass NH_3 -Konzentrationen von 50–150 ppm zu irritativen Gewebeschäden beitragen. Noch höhere Konzentrationen über Expositionszeiträume von Stunden können fokale Nekrosen in der Schleimhaut der Atemwege, Ödeme und Obstruktionen zur Folge haben (Schwartz, 1987). Nach Makarovsky et al. (2008) sollen NH_3 -Gehalte von 250 ppm über eine Expositionszeit von 30–60 min von den meisten Menschen toleriert werden, wogegen bei 700 ppm NH_3 Sofortreizungen am Auge und im Rachen zu verzeichnen sind. Bei mehr als 1500 ppm NH_3 treten pulmonale Ödeme, Husten und Laryngospasmen in Erscheinung. Nach etwa 30 min Exposition wirken NH_3 -Gehalte zwischen 2500 und 4500 ppm tödlich, wogegen ein sofortiger Exitus letalis im Bereich von 5000–10 000 ppm NH_3 aufgrund von Atemwegsobstruktionen zu erwarten ist (Makarovsky et al., 2008).

Akzidentuell bedingte Extremexpositionen

Weitreichende gesundheitliche Folgen entstehen bei plötzlichen und hohen Freisetzungen von Ammoniak. Im Wesentlichen zählen hierzu Unfälle von Ammoniaktransportierenden Tanklastzügen, Leckagen ortsfester Tanks oder auch Ammoniak-haltige Haushaltsreiniger (Close et al., 1980; Latenser und Lucktong, 2000; Wibbenmeyer et al., 1999). Die Auswirkungen sind häufig fatal und äußern sich in Hautverätzungen und umfangreichen Defekten am Auge und im Atemtrakt, die nicht nur akuter Natur sein müssen, sondern auch teilweise eine Chronizität entwickeln können (Amshel et al. 2000; Close et al., 1980). Hierfür steht stellvertretend ein Fallbeispiel nach einer Tankexplosion, wonach die exponierte Person in der Akutphase an einer obstruktiven Tracheobronchitis mit respiratorischer Insuffizienz litt, nach 10 Jahren aber immer noch Bronchiektasien bei ihr diagnostiziert werden konnten (Leduc et al., 1992).

In jüngerer Zeit spielen Zugriffe auf flüssigen Ammoniak enthaltene Tankwagen, wie sie in Nordamerika für die Düngung von landwirtschaftlichen Flächen teilweise gebraucht werden, eine zunehmend größere Rolle unter den chemisch bedingten Verätzungen. Hintergrund ist

die von Unfällen begleitete Beschaffung von Ammoniak für die illegale Methamphetamin-Herstellung bzw. die unsachgemäße Handhabung während der Drogenproduktion (Bloom et al., 2008; Lee et al., 2003). Befinden sich derartige Tankwagen in der Nähe von Ställen und kommt es zu Undichtigkeiten, werden auch Tiere in Mitleidenschaft gezogen. So berichten Fitzgerald et al. (2006) von zahlreichen Todesfällen unter Rindern und typischen makroskopisch erkennbaren Verätzungen an Augen und oberen Respirationstrakt sowie von Nekrosen, die sich entlang der Atemwege mikroskopisch verfolgen ließen.

Geflügel

Expositionen gegenüber Ammoniak können im Allgemeinen beim Wirtschaftsgeflügel von Leistungseinbußen und Gewebsveränderungen begleitet sein. Bei NH_3 -Gehalten von 50 und 75 ppm konnten Miles et al. (2004) bei Broilern einen signifikanten Einbruch der Körpergewichtsentwicklung über sieben Lebenswochen hinweg feststellen. Das Gas verursacht Photophobien aufgrund von Konjunktivitis, Entzündung und Ulzeration an der Augenhornhaut (Anderson et al., 1966; Anderson et al., 1968). Später beobachteten Miles et al. (2006) ebenfalls, dass steigende NH_3 -Konzentrationen von 25–75 ppm mit einer Zunahme von Augenläsionen (Uveitis) verbunden waren, die nach Ammoniakkarrenz eine schnelle Selbstheilung erfuhren, wie dies auch von Olanrewaju et al. (2007) beschrieben wurde. Strukturelle Veränderungen am Atemapparat unter Ammoniak einfluss konnten Al-Mashhadani und Beck (1985) bei Broilern entdecken, die bei NH_3 -Belastungen zwischen 75 und 100 ppm eine gesteigerte Zahl schleimproduzierender Zellen sowie eine Schrumpfung und Wanddickenzunahme der Luftkapillaren aufwiesen. Eine übermäßige Schleimproduktion, verfilzte Zilien und zilienlose Areale in der Trachealschleimhaut wurden in Puten gefunden, die NH_3 ab 10 ppm ausgesetzt waren (Nagaraja et al., 1983). Eine derartig gestörte mukoziliäre Clearance verursacht letztlich eine Zunahme von im respiratorischen Apparat verbleibenden Mikroorganismen wie beispielsweise *Escherichia coli* (Nagaraja et al., 1984) und vermag mit zur Steigerung der Krankheitsanfälligkeit beizutragen (Beker et al., 2004). Nach Anderson et al. (1964) kommen solche infektionsfördernden Prozesse bei Hühnern bereits in einer mit 20 ppm angereicherten NH_3 -Atmosphäre nach 72-stündiger Exposition vor und Kempf et al. (1988) konnten nach einer Ammoniakexposition von 100 ppm feststellen, dass sich nicht nur das Ausmaß und die Dauer einer *Mycoplasma gallisepticum*-Infektion verschärfte, sondern auch die trachealen Ziliarbewegungen zum Erliegen kamen. Ebenfalls mit Konzentrationen von etwa 100 ppm NH_3 operierten Oyetunde et al. (1978), die eine Verminderung der Futteraufnahme und Gewichtsverluste gegenüber einer nicht exponierten Hühnergruppe verzeichnen konnten, wobei die Läsionen im Atemtrakt jedoch minimal blieben. Diese Darstellung passt durchaus zum Resümee von Sander (1996), wonach die Spannweite der beobachtbaren Effekte von 20 ppm mit Gewichtsverlust über 50 ppm mit geringerer Futterverwertung bei Masthähnchen bis zu tolerierten kurzfristigen Luftgehalten von 100 ppm reicht, ohne dass die Produktionsleistung drastisch zurückgegangen ist. Wachstumseinbrüche bei Masthähnchen waren zu verzeichnen, wenn die Eier ≥ 25 ppm NH_3 -Konzentrationen während der Brutphase

ausgesetzt waren (Reece et al., 1980). Im Gegensatz zu lediglich mit einem Virusstamm der infektiösen Bronchitis geimpften Broilern beobachteten Quarles und Kling (1974) unter der Mitwirkung von NH_3 -Gehalten von 25 und 50 ppm in der Versuchsgruppe deutliche Luftsackentzündungen und reduzierte Körpermassenzunahmen. Zu vergleichbaren Ergebnissen kamen später Quarles und Fagerberg (1979), als sie Ammoniak- und Kokzidienexpositionen miteinander kombinierten, hier nun aber auch die intestinalen Läsionen verstärkt in Erscheinung traten.

Schweine

Auch beim Schwein existieren variable biologische Reaktionsweisen unter dem Einfluss verschiedener NH_3 -Konzentrationen. Konnte einerseits oberhalb von 25 ppm gehäuftes Auftreten von Arthritiden und porzinem Stresssyndrom (Donham, 1989) und andererseits bei 50 ppm eine quantifizierbare Wachstumseinbuße von 12 % beobachtet werden (Drummond et al. 1980), so mussten Drummond et al. (1980) und Stombaugh et al. (1969) schon Luftgehalte von 100 und 150 ppm NH_3 auf Schweine einwirken lassen, um überhaupt akute Entzündungen im Trachealbereich der Tiere erkennen zu können. Sutton et al. (1986) berichteten von Versuchen mit Schweinen, die einer 20-ppm-Atmosphäre ausgesetzt waren, aber dennoch keinerlei Gewichtszunahmeverluste, abnehmende Futterverwertungen oder gesundheitliche Beeinträchtigungen aufwiesen. Ebenso konnten Curtis et al. (1975) bei Ammoniakkonzentrationen, wie sie üblicherweise in kommerziell betriebenen Stallungen gefunden werden, keine signifikante Beeinflussung der Gewichtszunahmen oder Strukturänderungen im Atemtrakt feststellen. Nur in einem der insgesamt sieben Versuche wurden leichte Wachstumseinbußen und milde Bindehaut- und Lidrandentzündungen festgestellt. Im Vergleich zu einer Kontrollgruppe verursachten Expositionen von 50 und 100 ppm NH_3 bei mit Pasteurellen und Mykoplasmen inokulierten Ferkeln keine höhere Häufigkeit an Pneumonien, dennoch aber war die Wiederfindung von über Nasentupfer gesammelten Pasteurellen signifikant höher (Andreasen et al., 2000). Demgegenüber stehen Untersuchungen, in denen ab 50 ppm NH_3 signifikante Minderungen in den Tageszunahmen zu verzeichnen waren und das Ausmaß von Lungenläsionen nach Mykoplasma-/Pasteurellen-Infektion deutlich höher ausfiel als bei Tieren, die um mindestens Faktor 10 geringeren Konzentrationen exponiert waren (Andreasen et al., 1994). Um mindestens den Faktor 2 niedrigere NH_3 -Konzentrationen während einer 6-tägigen Expositionsphase mit maximal 100 ppm reichten bei Urbain et al. (1994) aus, um bei Schweinen signifikant sowohl das Körperwachstum zu mindern als auch eine Neutrophilenmigration in der Nasenschleimhaut als Zeichen entzündlicher Vorgänge zu provozieren.

Ammoniakexpositionen werden als infektionsbegünstigende Umstände mit Krankheitsbildern des Atemtraktes in Verbindung gebracht. Zur Auslösung beispielsweise einer *Rhinitis atrophicans* wurden Infektionsversuche mit *Bordetella bronchiseptica* bei Ferkeln unter einer Ammoniakatmosphäre von 50 und 100 ppm vorgenommen. Das Ausmaß der histopathologischen Veränderungen stieg mit höheren Ammoniakgehalten an (Drummond et al., 1981). Ähnliche bivariate Untersuchungen stammen von Hamilton et al. (1996), die synergistische Effekte zwischen Ammoniak und der

durch *Pasteurella multocida* induzierten Schnüffelkrankheit des Schweines feststellten. Interessant ist hier im Besonderen, dass gegenüber einer mit 0 ppm NH_3 exponierten Tiergruppe bereits bei Schweinen mit 5 ppm NH_3 in der Luft eine signifikant größere Nasenmuschelatrophy nach Rhinitisauslösung stattgefunden hat und bei 10 ppm Ammoniak der besagte Effekt ein Maximum erreichte. Aber auch ohne Erreger waren milde, doch statistisch gesicherte Nasenmuschelatrophyen ab 10 ppm NH_3 diagnostizierbar.

Ebenfalls in einer zweifaktoriellen Analyse testeten Urbain et al. (1996) die Wirkung von Ammoniak und Endotoxinen auf den Atemtrakt. So wurden nach Exposition mit Endotoxinen unter einer 5 ppm NH_3 -angereicherten Luft keine Läsionen, nach einer 50 ppm NH_3 -Exposition gleichwohl Effekte wie eine erhöhte Albuminexsudation und Zellinfiltration der Nasenschleimhaut gefunden, was nach Autorenmeinung die irritative Potenz des Ammoniaks widerspiegelt und wiederum die entzündliche Einwirkung biologischer Agenten wie Endotoxine verstärkt.

Da die Stallluft eine Vielzahl unterschiedlichster Luftverunreinigungen enthält, denen die Tiere zeitgleich ausgesetzt sind, haben Versuche mit mehr als zwei potenziellen aerogenen Noxen, die Gase, Keime und Stäube einbeziehen, einen besonderen Stellenwert. Praxisnah gelingt eine Einschätzung derzeit aber nur mit epidemiologischen Untersuchungen. So konnte Baekbo (1990) zeigen, dass es eine offensichtliche Beziehung zwischen der Empfänglichkeit von Schweinen für Rhinitis atrophicans und dem Gehalt der Stallluft an Staub, Endotoxinen, Gesamtkeimen und eben auch Ammoniak gibt. Dieser Befund wurde von Robertson et al. (1990) in einer Untersuchung an 1117 Schweinen aus zwölf Ställen bestätigt. Dabei wurde sowohl die Luftqualität erfasst als auch eine pathologisch-anatomische Beurteilung der Nasenmuscheldeformationen als Indikator für eine manifeste Schnüffelkrankheit vorgenommen. Die Höhe der Luftbelastung mit Ammoniak, Stäuben und Keimen hatte einen signifikanten Einfluss auf die Schwere der morphologischen Veränderungen im Nasenbereich der Schweine.

Rinder

Respiratorische Erkrankungen bei Kälbern sind im Allgemeinen Folge eines multifaktoriellen Geschehens, in dem unbelebte und belebte Stressoren die Abwehrkräfte der Tiere vorab überforderten. Besonders unzureichende mikroklimatische Verhältnisse und Luftströmungen fördern die Infektionshaftung im Atemtrakt (Radostits et al., 2007). Schädliche Gase wie das Ammoniak sind daher als exogene Faktoren ätiologisch mit zu berücksichtigenden (Danilewski, 1985). Aufgrund der Tatsache, dass die Kälberlunge in den ersten Lebenswochen noch unreif ist (Bardella, 2002), dürfte sich der NH_3 -Einfluss zudem noch verstärken. Hinzu kommt, dass die Lunge beim Rind im Gegensatz zum Tierkörper relativ klein ist (Bardella, 2002), womit das notwendige pulmonale Ventilationsaufkommen im Vergleich zu anderen Tierarten größer ist und damit auch die Menge des eingeatmeten NH_3 pro Zeiteinheit steigt (Kumulationseffekt). Bei Kälbern erhöhen Ammoniak-Konzentrationen von > 20 ppm das Krankheitsrisiko durch Zerstörung des Flimmerepithels im Atemtrakt (EFSA, 2012).

Erwachsene Rinder zeigten während eines zwölf-tägigen Versuches unter NH_3 -Gehalten von etwa 32,5

und 48 ppm eine vermehrte Tränenflüssigkeitsbildung, nasale Sekretion und Hustensymptomatik sowie deutliche zelluläre Anzeichen einer pulmonalen Entzündung (Phillips et al., 2010), die im übrigen später auch bei Schafen unter vergleichbaren Expositionsbedingungen zu Tage traten (Phillips et al., 2012a). Untersuchungen zu den Wechselwirkungsbeziehungen zwischen Haltungsbedingungen, Gesundheit und Zuchtleistung von Färsen wiesen auf eine verspätete Abkalbung hin, wenn die Tiere keinen Weidezugang hatten und Stallluftgehalten an NH_3 von > 10 ppm ausgesetzt waren. Eine Erklärung hierfür wird in der Entstehung subklinischer respiratorischer Erkrankungen oder in gesteigerten Stresszuständen gesehen, die die Reproduktionsleistung verschlechterten (Hultgren et al., 2008).

Erfassung der Belastungssituation

Für die Messung von Ammoniak stehen eine Reihe von Bestimmungsmethoden zur Verfügung, die sich in physikalische, chemische und sensorische Verfahren einteilen lassen. Unter diesen Verfahren befinden sich wiederum Methoden, mit den Kurzzeitmessungen (Einzelmessung, diskontinuierliche Messung) oder Langzeitmessungen (kontinuierliche Messwertaufzeichnung) möglich sind. Hierfür stehen beispielsweise Anwendungstechniken wie die optoakustische Infrarot-Spektroskopie, der Einsatz von Passivsammlern in Verbindung mit der Gaschromatographie oder auch elektrochemische Gasetektoren für die Direktmessung zur Verfügung. Gemessen an der Praktikabilität (z. B. Sofortablesung des Messwertes vor Ort) und den Kosten hat sich im Wesentlichen das Prüfröhrchen in Verbindung mit einer Handbalgpumpe als klassisches Verfahren der Gasanalyse in Ställen durchgesetzt (Gasspürgerät). Neben den damit durchführbaren zeitlich eng begrenzten Einzelmessungen (Minuten) erlauben sogenannte Diffusionsröhrchen Langzeitmessungen (Stunden bis Tage). Ihr Messresultat ist als Konzentrationsmittelwert über die Expositionszeit aufzufassen. Die Nachteile der Prüfröhrchen sind im Wesentlichen in ihrer relativen Messungenauigkeit und in ihren Querempfindlichkeiten zu suchen. Eine ausführliche Charakterisierung von verschiedenen Ammoniak-Messmethoden findet sich in der KTBL-Schrift 401 (2001).

Neben der eigentlichen Ammoniakbestimmung sind Ort und Zeit der Messung(en) festzulegen, da sich die zu beobachtenden Ammoniakkonzentrationen ausgesprochen dynamisch verhalten können. Einflussgrößen wie Tieraktivität, Temperatur oder auch Luftbewegung sind dieser Dynamik geschuldet. So zeigt Seedorf (2003) an einem Sauenstall, wie sich über 24 Stunden an sieben Messpositionen Konzentrationsschwankungen zwischen etwa 10–30 ppm einstellen können.

Nach Hilliger (1990) liefert die Anamnese und ein Stalldurchgang erste wichtige Hinweise über ein etwaiges Ammoniakproblem, was wiederum hilft, die Fragestellung der Messungen zu konkretisieren (z. B. Messwerterfassung im ganzen Stall oder nur in bestimmten Stallbereichen, die durch erhöhte respiratorische Erkrankungsfrequenzen aufgefallen sind). Im günstigsten Fall käme ein „auf den Stall zugeschnittener“ Messplan zustande, der u. a. eine zweckmäßige Verteilung der Messpunkte im Stall vorsehen sollte. Demgegenüber stehen generelle Empfehlungen, nach denen maximal

zehn Messpunkte im Stall und ein Messpunkt außerhalb des Stalles zu positionieren sind. Bei nur drei Messpunkten sollten diese in diagonaler Linie im Stall angeordnet sein (Müller und Schlenker, 2004).

Diskussion

Ammoniak stellt ein Leitgas in der Beurteilung der Luftqualität in der Nutztierhaltung dar. Nicht immer allerdings lassen sich deutliche, auf das Ammoniak allein oder in Kombination mit anderen Stoffen zurückführende Gesundheitseffekte am Tier nachweisen (Andreasen et al., 2000; Done et al., 2005; Mayan und Merilan, 1976; Sutton et al., 1986), wie auch widersprüchliche Effekte festzustellen sind (Lundborg et al., 2005). Unterschiedliche genetische Linien der Versuchstiere, variabel gehaltene Expositionskonzentrationen und -zeiten oder auch die Verwendung unterschiedlicher Untersuchungsparameter, die auf Expositionen hin ebenso Ergebnisse verschiedener Ausprägung zu liefern vermögen (Actio-Reactio-Divergenz), sind nur einige wenige denkbare Gründe für die teilweise voneinander abweichenden Beobachtungen. Trotz alledem lässt doch alleine die alkalische Wirkungsweise des Gases grundsätzlich auf dessen gewebsschädigendes und physiologisch belastendes Potenzial schließen. So zeigt erwartungsgemäß die Mehrheit der veröffentlichten Untersuchungen Wirkungen beim Tier, die von Leistungsabnahmen bis zu makroskopisch und mikroskopisch feststellbaren Veränderungen beim Tier nach NH_3 -Exposition zu beobachten waren. Nicht umsonst wird darauf verwiesen, dass Ammoniak in der Ätiologie respiratorischer Erkrankungen eine Rolle spielt und entsprechende Umfeldverbesserungen zur Lösung des Gesundheitsproblems beitragen (Carr, 2010).

Seit Dekaden wird ein Grenzwert für Ammoniak von 20 ppm in Tierhaltungsverordnungen genannt, so auch in der aktuellen Tierschutznutztierhaltungsverordnung (TierSchNutzV, 2006), doch dürfte dieser Wert wenig (rechtlich) anwendungstauglich sein, da keine maximal tolerierbare Expositionszeit mit dem Grenzwert verknüpft ist, sondern allenfalls von einer dauerhaften Einwirkung die Rede ist. Konkrete Zeitangaben sind aber unumgänglich, um über Konzentration-Zeitbeziehungen einen vermeintlichen Gesundheitseffekt ableiten zu können. Dies ist beim Menschen über die geltenden maximalen Arbeitsplatzkonzentrationen realisiert worden und wäre daher auch für das Nutztier wünschenswert.

Aber auch der derzeit festgelegte Grenzwert für Nutztiere sollte in seiner Sinnhaftigkeit kritisch hinterfragt werden, nachdem beispielsweise für Schweine aus tierärztlicher Sicht eine tolerierbare Höchstkonzentration von 10 ppm NH_3 vorgeschlagen wird (Kerßens und Hellweg, 2012). Der Weg zu einem geringeren zulässigen Maximalgehalt als gesetzlich vorgegeben wird von Verhaltensstudien an Schweinen gestützt, die eine Ammoniak-freie Atmosphäre mehrheitlich bevorzugen, wenn sie zwischen belasteter und unbelasteter Luft frei wählen können (Jones et al., 1996; Smith et al., 1996). Dieses Meidungsverhalten lässt sich im übrigen auch bei Legehennen (Kristensen et al., 2000) sowie bei Broilern (Jones et al., 2005) beobachten. Es kann offensichtlich nicht ausgeschlossen werden, dass neben den skizzierten klinisch-pathologischen und

histomorphologischen Veränderungen, Aversionen gegenüber Ammoniak Ausdruck einer unangenehmen sensorischen Wahrnehmung sind (Phillips et al., 2012b) und infolgedessen mit einer emotionalen Stresssituation einhergehen. Erhöhte Serum-Cortisolspiegel nach NH₃-Exposition könnten hierfür ein Indikator sein (von Borell et al., 2007). In diesem Zusammenhang wäre es interessant zu eruieren, welchen Anteil die angesprochenen Tachykinin-ausgelösten (Schmerz-)Empfindungen an der Ammoniak-vermittelten Stressbelastung haben.

Ungleich schwieriger wird es sein, direkte Ammoniakwirkungen im Wechselspiel mit anderen Luftinhaltsstoffen abzugrenzen und zu bewerten, zumal kombinatorische Effekte zu erwarten sind. Um einen möglichen Ausweg aus diesem Bewertungsengpass aufzuzeigen, wird die mathematische Anwendung eines sogenannten Luftbelastungsindex für die Nutztierhaltung (LBI_N) vorgeschlagen, der anhand von definierten Indexklassen den Belastungsgrad von Tieren der Spezies s in einem Stall von schwach über deutlich bis extrem belastet beschreibt, indem die errechneten Werte den besagten Indexklassen zugeordnet werden (Seedorf, 2003; Seedorf, 2004). Die entsprechende Basisformel lautet:

$$LBI_{Ns} = \sum_{i=1}^n \left[\frac{C_x}{R_x} \right]_i$$

wobei C_x die gemessene Konzentration des spezifischen Luftinhaltsstoffes und R_x die Richtwertkonzentration des gleichsinnigen Luftinhaltsstoffes im Stall darstellt. Ob durch derartige mathematische Ansätze die Belastungssituation für Nutztiere ausreichend genau beschrieben werden kann, bleibt abzuwarten. Nichtsdestotrotz dürften auch zukünftig Spurengase wie das Ammoniak auf der Agenda tierhygienischer Problemstellungen einen wichtigen und damit bleibenden Stellenwert einnehmen.

Widmung

Zu Ehren Herrn Prof. Dr. Dr. h. c. Jörg Hartung, Stiftung Tierärztliche Hochschule Hannover, anlässlich seiner Verdienste um die Tier- und Umwelthygiene.

Conflict of interest

Es bestehen keine geschützten, finanziellen, beruflichen oder anderen persönlichen Interessen an einem Produkt, Service und/oder einer Firma, welche die in diesem Manuskript dargestellten Inhalte oder Meinungen beeinflussen könnten.

Literatur

- Al-Mashhadani EH, Beck MM (1985):** Effect of atmospheric ammonia on the surface ultrastructure of the lung and trachea of broiler chicks. *Poultry Sci* 64: 2056–2061.
- Amshel CE, Fealk MH, Phillips BJ, Caruso DM (2000):** Anhydrous ammonia burns case report and review of the literature. *Burns* 26: 493–497.
- Anderson DP, Beard CW, Hanson RP (1964):** The adverse effects of ammonia on chickens including resistance to infection with Newcastle disease virus. *Avian Dis* 8: 369–379.

Anderson DP, Beard CW, Hanson RP (1966): Influence of poultry house dust, ammonia, and carbon dioxide on the resistance of chickens to Newcastle disease virus. *Avian Dis* 10: 177–188.

Anderson DP, Wolfe RR, Chermis FL, Roper WE (1968): Influence of dust and ammonia on the development of air sac lesions in turkeys. *Am J Vet Res* 29:1049–1058.

Andreasen M, Baekbo P, Nielsen K (1994): Effect of aerial ammonia on the MIRDC complex. Proceedings of the 13th International Pig Veterinary Society, Thailand, 429.

Andreasen M, Baekbo P, Nielsen JP (2000): Lack of effect of aerial ammonia on atrophic rhinitis and pneumonia induced by *Mycoplasma hyopneumoniae* and toxigenic *Pasteurella multocida*. *J Vet Med B Infect Dis Vet Public Health* 47:161–171.

Agency for Toxic Substances and Disease Registry, ATSDR (2004): Toxicological profile for ammonia., U.S. Department of Health and Human Services, 269 S.

Baekbo P (1990): Air quality in Danish pig herds. Proceedings of the 11th International Pig Veterinary Society, Switzerland, 395.

Bardella I (2002): Ursachen und Behandlungsmöglichkeiten von Atemwegserkrankungen bei Kälbern. *Nutztierpraxis Aktuell* 3, 4 S.

Barnes PJ (2001): Neurogenic inflammation in the airways. *Respir Physiol* 125: 145–154.

Beker A, Vanhooser SL, Swartzlander JH, Teeter RG (2004): Atmospheric ammonia concentration effects on broiler growth and performance. *J Appl Poult Res* 13:5–9.

Bloom GR, Suhail F, Hopkins-Price P, Sood A (2008): Acute anhydrous ammonia injury from accidents during illicit methamphetamine production. *Burns* 34: 713–718.

Bottje WG, Wang S, Kelly FJ, Dunster C, Williams A, Mudway I (1998): Antioxidant defenses in lung lining fluid of broilers: Impact of poor ventilation conditions. *Poult Sci* 77: 516–522.

Cao YQ, Mantyh PW, Carlson EJ, Gillespie A-M, Epstein CJ, Basbaum AI (1998): Primary afferent tachykinins are required to experience moderate to intense pain. *Nature* 392: 390–394.

Carlile FS (1984): Ammonia in poultry houses: A literature review. *World's Poultry Sci J* 40: 99–113.

Carr J (2010): Environmental medicine tool box for pig vets. *In Pract* 32: 218–230.

Close LG, Catlin FI, Cohn AM (1980): Acute and chronic effects of ammonia burns of the respiratory tract. *Arch Otolaryngol* 106:151–158.

Curtis SE, Anderson CR, Simon J, Jensen AH, Day DL, Kelley KW (1975): Effects of aerial ammonia, hydrogen sulfide, and swine-house dust on rate of gain and respiratory-tract structure in swine. *J Anim Sci* 41: 735–739.

Danilewski WM (1985): Krankheiten der Atmungsorgane. In: Rossow N, Horváth J (Hrsg.), *Organerkrankungen*, Band I, Gustav Fischer Verlag, Stuttgart, 247–306.

Done SH, Chennells DJ, Gresham AC, Williamson S, Hunt B, Taylor LL, Bland V, Jones P, Armstrong D, White RP, Demmers TG, Teer N, Wathes CM (2005): Clinical and pathological responses of weaned pigs to atmospheric ammonia and dust. *Vet Rec* 157: 71–80.

Donham KJ (1989): Relationship of air quality and productivity in intensive swine housing. *Agric Pract* 10: 15–26.

- Drummond JG, Curtis SE, Meyer RC, Simon J, Norton HW (1981):** Effects of atmospheric ammonia on young pigs experimentally infected with *Bordetella bronchiseptica*. *Am J Vet Res* 42: 963–968.
- Drummond JG, Curtis SE, Simon J, Norton HW (1980):** Effects of aerial ammonia on growth and health of young pigs. *J Anim Sci* 50: 1085–1091.
- EFSA (2012):** Scientific Opinion on the welfare of cattle kept for beef production and the welfare in intensive calf farming systems. *EFSA Journal* 10: 2669, 166 pp.
- Fischer H, Widdicombe JH (2006):** Mechanisms of acid and base secretion by the airway epithelium. *J Membrane Biol* 211: 139–150.
- Fitzgerald SD, Grooms DL, Scott MA, Clarke KR, Rumblei WK (2006):** Acute anhydrous ammonia intoxication in cattle. *J Vet Diagn Invest* 18: 485–489.
- Groot Koerkamp PWG, Metz JHM, Uenk GH, Phillips VR, Holden MR, Sneath RW, Short JL, White RP, Hartung J, Seedorf J, Schröder M, Linkert KH, Pedersen S, Takai H, Johnsen JO, Wathes CM (1998):** Concentrations and emissions of ammonia in livestock buildings in Northern Europe. *J Agric Engng Res* 70: 79–95.
- Hamilton TDC, Roe JM, Webster AJF (1996):** Synergistic role of gaseous ammonia in etiology of *Pasteurella multocida*-induced atrophic rhinitis in swine. *J Clin Microbiol* 34: 2185–2190.
- Hilliger HG (1990):** Stallgebäude, Stallluft und Lüftung. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 81 S.
- Hoerr FJ (2010):** Clinical aspects of immunosuppression in poultry. *Avian Dis* 54: 2–15.
- Holma B, Lindegren M, Andersen JM (1977):** pH effects on ciliomotility and morphology of respiratory mucosa. *Arch Environ Health* 32: 216–226.
- Hultgren J, Svensson C, Maizon DO, Oltenacu PA (2008):** Rearing conditions, morbidity and breeding performance in dairy heifers in southwest Sweden. *Prev Vet Med* 87: 244–260.
- Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, IFA (2012):** GESTIS Stoffdatenbank. Ammoniak., [http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001100.xml?f=templates\\$fn=default.htm\\$3.0](http://gestis.itrust.de/nxt/gateway.dll/gestis_de/001100.xml?f=templates$fn=default.htm$3.0), Zugriff am 19.05.2012.
- Jones JB, Burgess LR, Webster AJF, Wathes CM (1996):** Behavioural responses to pigs to atmospheric ammonia in a chronic choice test. *Anim Sci* 63: 437–445.
- Jones EKM, Wathes CM, Webster AJF (2005):** Avoidance of atmospheric ammonia by domestic fowl and the effect of early experience. *Appl Anim Behav Sci* 90: 293–308.
- Kempf I, Cacou PM, Guittet M, Ollivier C, Morin M, L'hospitalier R, Bennejean G (1988):** Mycoplasmoses à *Mycoplasma gallisepticum*: réalisation d'un modèle expérimental rôle de l'ammoniac comme facteur d'exacerbation. *Avian Pathol* 17: 601–616.
- Kerßens A, Hellweg E-G (2012):** Klima und Wetter im Schweinestall. Agrar- und Veterinärakademie, 1. Aufl., Horstmar-Leer, 78 S.
- Klimmer M (1914):** Veterinärhygiene. Verlagsbuchhandlung Paul Parey, 2. Aufl., Berlin, 509 S.
- Kristensen HK, Burgess LR, Demmers TGH, Wathes CM (2000):** The preferences of laying hens for different concentrations of atmospheric ammonia. *Appl Anim Behav Sci* 68: 307–318.
- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., KTBL (2001):** Messmethoden für Ammoniak-Emissionen. Darmstadt, KTBL-Schrift 401, 137 S.
- Latenser BA, Lucktong TA (2000):** Anhydrous ammonia burns: Case presentation and literature review. *J. Burn Care Rehabil* 21: 40–42.
- Leduc D, Gris P, Lheureux P, Gevenois PA, De Vuyst P, Yernault JC (1992):** Acute and long term respiratory damage following inhalation of ammonia. *Thorax* 47: 755–757.
- Lee JH, Farley CL, Brodrick CD, Blomquist PH (2003):** Anhydrous ammonia eye injuries associated with illicit methamphetamine production. *Ann Emerg Med* 41: 157.
- Lundborg GK, Svensson EC, Oltenacu PA (2005):** Herd-level risk factors for infectious diseases in Swedish dairy calves aged 0–90 days. *Prev Vet Med* 68: 123–143.
- Makarovsky I, Markel G, Dushnitsky T, Eisenkraft A (2008):** Ammonia – when something smells wrong. *Isr Med Assoc J* 10: 537–543.
- Mayan MH, Merilan CP (1976):** Effects of ammonia inhalation on young cattle. *N Z Vet J* 24: 221–224.
- Mehlhorn G (1979):** Lehrbuch der Tierhygiene. VEB Gustav Fischer Verlag Jena, Band 1, 557 S.
- Miles DM, Branton SL, Lott BD (2004):** Atmospheric ammonia is detrimental to the performance of modern commercial broilers. *Poultry Sci* 83:1650–1654.
- Miles DM, Miller WW, Branton SL, Maslin WR, Lott BD (2006):** Ocular responses to ammonia in broiler chickens. *Avian Dis* 50:45–49.
- Moreaux B, Nemmar A, Gustin P (2000):** Effet de l'ammoniac sur la fibre-C impliquée dans le reflexe de la toux chez le porc. 32èmes Journées de la Recherche Porcine en France, Paris, France, 1-2 Février, 32, 19–23.
- Müller W, Schlenker G. (2004):** Kompendium der Tierhygiene. Lehmanns Media, Berlin, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 148 S.
- Nagaraja KV, Emery DA, Jordan KA, Newman JA, Pomeroy BS (1983):** Scanning electron microscopic studies of adverse effects of ammonia on tracheal tissue of turkeys. *Am J Vet Res* 44: 1530–1536.
- Nagaraja KV, Emery DA, Jordan KA, Sivanandan V, Newman JA, Pomeroy BS (1984):** Effect of ammonia on the quantitative clearance of *Escherichia coli* from lungs, air sacs, and livers of turkeys aerosol vaccinated against *Escherichia coli*. *Am J Vet Res* 45:392–395.
- Olanrewaju HA, Miller WW, Maslin WR, Thaxton JP, Dozier III, WA, Purswell J, Branton, SL (2007):** Interactive effects of ammonia and light intensity on ocular, fear and leg health in broiler chickens. *Int J Poultry Sci* 6: 762–769.
- Oyetunde OOF, Thomson RG, Carlson HC (1978):** Aerosol exposure of ammonia, dust and *Escherichia coli* in broiler chickens. *Can Vet J* 19: 187–193.
- Phillips CJ, Pines MK, Latter M, Muller T, Petherick JC, Norman ST, Gaughan JB (2010):** The physiological and behavioral responses of steers to gaseous ammonia in simulated long-distance transport by ship. *J Anim Sci* 88: 3579–3589.
- Phillips CJ, Pines MK, Latter M, Muller T, Petherick JC, Norman ST, Gaughan JB (2012a):** Physiological and behavioral responses of sheep to gaseous ammonia. *J Anim Sci* 90: 1562–1569.

- Phillips CJ, Pines MK, Muller T (2012b):** The avoidance of ammonia by sheep. *J Vet Behav* 7: 43–48.
- Quarles CL, Fagerberg DJ (1979):** Evaluation of ammonia stress and coccidiosis on broiler performance. *Poultry Sci* 58: 465–468.
- Quarles CL, Kling HF (1974):** Evaluation of ammonia and infectious bronchitis vaccination stress on broiler performance and carcass quality. *Poultry Sci* 53: 1592–1596.
- Radostits OM, Gay CC, Hinchcliff KW, Constable PD (2007):** *Veterinary Medicine*. Saunders Elsevier, 10. Aufl., 2156 S.
- Reece FN, Lott BD, Deaton JW (1980):** Ammonia in the atmosphere during brooding affects performance of broiler chickens. *Poultry Sci* 59: 486–488.
- Reynolds SJ, Chao DY, Thorne PS, Subramanian P, Waldron PF, Selim M, Whitten PS, Pependorf WJ (1998):** Field comparison of methods for evaluation of vapor/particle phase distribution of ammonia in livestock buildings. *J Agric Safety Health* 4: 81–93.
- Robertson JF, Wilson D, Smith WJ (1990):** Atrophic rhinitis: The influence of the aerial environment. *Anim Prod* 50: 173–182.
- Rogan MP, Geraghty P, Greene CM, O'Neill SJ, Taggart CC, McElvaney NG (2006):** Antimicrobial proteins and polypeptides in pulmonary innate defence. *Respir Res* 7: 29, 11 pp.
- Rogers DF (1994):** Airway goblet cells: Responsive and adaptable front-line defenders. *Eur Respir J* 7: 1690–1706.
- Sander JE (1996):** Environmental respiratory pathogens: Poultry house gases and dust. *Zootecnica Intern*, February, 25–27.
- Sant'Ambrogio G, Widdicombe J (2001):** Reflexes from airway rapidly adapting receptors. *Respir Physiol* 125: 33–45.
- Schwartz DA (1987):** Acute inhalational injury. *Occup Med* 2: 297–318.
- Seedorf J (2003):** Die integrierte tier- und umwelthygienische Erfassung und Bewertung von Bioaerosolen in der Nutztierhaltung unter Einsatz eines mobilen Meßkonzeptes. Habilitationsschrift, Tierärztliche Hochschule Hannover.
- Seedorf J (2004):** Der Luftbelastungsindex (LBI_N) – Ein neues Konzept zur Kontrolle und Verbesserung von Tiergesundheit und Tierschutz. Tagungsband der 11. Freilandtagung/17. IGN-Tagung, 23-25.09.04, Wien, Österreich, 21–24.
- Seedorf J, Hartung J (1999):** Survey of ammonia concentrations in livestock buildings. *J Agric Sci* 133: 433–437.
- Smith JH, Wathes CM, Baldwin BA (1996):** The preference of pigs for fresh air over ammoniated air. *Appl Anim Behav Sci* 49: 417–424.
- Stombaugh DP, Teagua HS, Roller WL (1969):** Effects of atmospheric ammonia on the pig. *J Anim Sci* 28: 844–847.
- Sutton AL, Malayer JR, Diekman MA, Kelly DT, Jones DD, Long GG (1986):** Effects of manure gases on swine health and production. *Am Soc Agric Eng, Paper-No.* 86-4038.
- Takai H, Nekomoto K, Dahl P, Okamoto E, Morita S, Hoshiba S (2002):** Ammonia contents and desorption from dusts collected in livestock buildings. *Agricultural Engineering International: The CIGR Journal of Scientific Research and Development*. Manuscript BC 01 005, Vol. IV, 11 pp.
- TierSchNutzV (2006):** Verordnung zum Schutz landwirtschaftlicher Nutztiere und anderer zur Erzeugung tierischer Produkte gehaltener Tiere bei ihrer Haltung. Tierschutz-Nutztierhaltungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 22. August 2006 (BGBl. I S. 2043).
- Urbain B, Gustin P, Prouvost J-F, Ansay M (1994):** Quantitative assessment of aerial ammonia toxicity to the nasal mucosa by use of the nasal lavage method in pigs. *Am J Vet Res* 55: 1335–1340.
- Urbain B, Prouvost J-F, Beerens D, Ansay M, Gustin P (1996):** Acute effects of endotoxin inhalation on the respiratory tract in pigs: Interaction with ammonia. *Inhal Toxicol* 8: 947–968.
- von Borell E, Özpınar A, Eslinger KM, Schnitz AL, Zhao Y, Mitloehner FM (2007):** Acute and prolonged effects of ammonia on hematological variables, stress responses, performance, and behavior of nursery pigs. *J Swine Health Prod* 15: 137–145.
- Wenger I (1999):** Air quality and health of career pig barn workers. *Adv Pork Prod* 10: 93–101.
- Wibbenmeyer LA, Morgan LJ, Robinson BK, Smith SK, Lewis RW, Kealey GP (1999):** Our chemical burn experience: Exposing the dangers of anhydrous ammonia. *J Burn Care Rehabil* 20: 226–231.
- Willmes, A (1993):** *Handbuch Chemie*. Verlag Harri Deutsch, 1. Aufl., 820 S.

Korrespondenzadresse:

Prof. Dr. Jens Seedorf
 Fakultät Agrarwissenschaften und Landschaftsarchitektur
 Hochschule Osnabrück
 Oldenburger Landstr. 62
 49090 Osnabrück
 jseedorf@hs-osnabrueck.de